



XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP
Artigo CREEM2012

MODELANDO SISTEMAS TÉRMICOS COM O *ENGINEERING EQUATION SOLVER* (EES): FACILIDADE DE PROGRAMAÇÃO E OBTENÇÃO DE RESULTADOS

**Fabrcio Alexandre Alves Ceranto, Karen Aldicléia da Silva,
Paulo Henrique Dias dos Santos e Thiago Antonini Alves**

UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa.
CEP 84016-210, Ponta Grossa, Paraná. Curso de Engenharia Mecânica.

E-mails para correspondência: *fabricioceranto@hotmail.com*, *ka_silva@msn.com*,
psantos@utfpr.edu.br, *thiagooalves@utfpr.edu.br*

Introdução

Na Engenharia, os *softwares* para simulação de problemas têm ganhado muito destaque, uma vez que permitem maior velocidade no projeto e conseqüentemente, menor custo, além da possibilidade de simulação de soluções ótimas sem ser necessária a construção de protótipos. Muitos *softwares* (CFX/FLUENT/ANSYS, COMSOL, Matlab, MathCAD, entre outros) têm ganhado destaque na modelagem de sistemas térmicos em suas diversas aplicações. Dentre esses *softwares*, devido a sua versatilidade, o *Engineering Equation Solver* (EES) tem sido bastante utilizado para a solução de problemas, não só na modelagem de sistemas térmicos, mas também nas mais diversas áreas.

O EES tem se destacado na resolução de problemas de várias áreas da Engenharia, inclusive de Sistemas Térmicos (Mecânica dos Fluidos, Transferência de Calor e Termodinâmica). Isto se deve ao fato de que o *software* possui sub-rotinas capazes de calcular propriedades térmicas e fluidodinâmicas de vários sólidos, líquidos e gases que são frequentemente utilizados em aplicações de Sistemas Térmicos, desde propriedades termodinâmicas a propriedades de transporte (correlatas à Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos) destas matérias. Além disso, o EES possui sub-rotinas para o cálculo de trocadores de calor de diferentes geometrias (tubo concêntrico, casco e tubo, compactos, com ou sem mudança de fase).

O EES nada mais é do que um solucionador de sistemas de equações – sejam elas lineares, não-lineares ou diferenciais – de modo que o projetista deve inserir as equações que descrevem o problema, podendo então obter o valor de variáveis que não eram conhecidas. Para tanto, deve ser conhecido um número suficiente de condições de contorno do problema, para que o sistema de equações estabelecido seja resolvível (número de variáveis conhecidas pelo menos igual ao número de equações no caso de sistemas lineares de equações). O método de solução do sistema de equações do EES é baseado no método iterativo de Newton-Raphson.

Assim, para problemas de engenharia de menor complexidade, ou onde se conheça um número de condições de contorno suficiente, o EES pode substituir, com sucesso, *softwares* específicos, que normalmente utilizam métodos de simulação mais avançados, de modo que são *softwares* mais caros e que demoram mais para processar uma solução do que o EES. Ressalta-se ainda, que o EES não requer linguagem especial de programação.

Segundo Cañizares e Faur (1997), com o EES as equações são digitadas pelo projetista como quem as escreve no papel. Além disso, o programa, devido suas características, resolve os problemas estabelecidos numa velocidade bastante grande em comparação com *softwares* de simulação mais avançados.

Com o EES também é possível verificar como uma variável do sistema de equações varia em função de outra em gráficos bidimensionais (plano cartesiano), bem como esboçar gráficos de propriedades termodinâmicas dos materiais, como os gráficos de mudança de fase de alguns materiais, sob as coordenadas $T-s$, $T-v$, $P-v$, $P-h$ ou $h-s$.

Quando se trabalha com algum problema, cujas propriedades dos materiais envolvidos não podem ser calculadas utilizando as sub-rotinas do EES, novas sub-rotinas para o cálculo destas propriedades podem ser criadas para os materiais, desde que se existam dados experimentais suficientes para a construção de tal tabela numa faixa de propriedades desejada. A parte de interpolação que pode ser necessária para construção de uma nova tabela é feita pelo próprio *software*.

Assim, pode-se sintetizar que as principais vantagens do EES, em relação aos *softwares* mais sofisticados são:

- Facilidade de entendimento e de uso (programação);
- Velocidade na resolução dos problemas estabelecidos;
- Baixa capacidade computacional requerida;
- Baixo custo.

As principais limitações do EES são inerentes a sua capacidade de número de variáveis que é limitada em comparação com outros *softwares* e a solução de equações que envolvem operações logarítmicas.

Entretanto a literatura mostra uma série de desenvolvimentos tecnológicos de relativa complexidade, onde se utilizou o EES para fazer a modelagem, como nos trabalhos de Adams *et al.* (1998); Liao *et al.* (2000); Bazilian e Prasad (2002); Forristall (2003), entre outros.

No caso da Termodinâmica, pode-se resolver com facilidade problemas de sistemas de potência a vapor ou a gás, desde que se conheça uma quantidade mínima necessária de propriedades em certos estados previamente definidos, mas que podem ser alteradas posteriormente, verificando-se, por exemplo, qual é o valor ótimo desta propriedade para a obtenção de uma eficiência máxima ou potência de saída líquida máxima no sistema. A seguir será apresentado um breve exemplo da utilização do EES em um problema termodinâmico de projeto de um sistema de potência a vapor.

Modelando um Sistema de Potência a Vapor com o EES

Um importante objetivo da engenharia é desenvolver sistemas que utilizem os tipos desejados de conversão de energia. Dentre estes sistemas destacam-se os Sistemas de Potência a Vapor, Sistemas de Potência a Gás, Usinas Hidroelétricas e Motores de Combustão Interna, que juntos produzem a grande maioria da potência elétrica e mecânica utilizada no mundo (MORAN; SHAPIRO, 2009).

Sistemas de Potência a Vapor (SPVs) são aqueles que produzem uma potência líquida de saída (mecânica, mas posteriormente quase sempre convertida em elétrica) a partir do trabalho realizado sobre uma turbina a vapor por um fluido que percorre um ciclo termodinâmico se vaporizando e condensando alternadamente. A grande maioria das plantas de geração de energia elétrica são instalações de potência a vapor em alguma das suas variações (MORAN; SHAPIRO, 2009; ÇENGEL; BOLES, 2006).

Estas instalações de potência a vapor são comumente denominadas Termelétricas e podem operar tendo como fonte primária de energia tanto combustíveis fósseis (carvão, gás natural, etc.), quanto combustíveis renováveis, como algum tipo de biomassa (Bagaço de Cana de Açúcar, Biogás, Capim Elefante, Casca de Arroz, Licor Negro, Resíduos de Madeira, etc.) (BIG, 2012). É interessante observar que alguns combustíveis fósseis ou renováveis, como o biogás e gás natural podem tanto ser combustíveis em Sistemas de Potência a Gás, realizando combustão com ar previamente comprimido para fornecer a energia da combustão para movimentar a turbina a gás, quanto em sistemas de potência a vapor, onde se aproveita o calor da combustão para aquecer a água que percorre o ciclo, vaporizando-a para que ela forneça energia para a turbina a gás.

Os SPVs possuem basicamente quatro componentes responsáveis pela conversão de energia do combustível para a turbina, por meio da água: caldeira (onde calor é transferido do combustível para a água numa medida que esta seja totalmente vaporizada), turbina a vapor (onde energia da água é parcialmente transferida para a turbina), condensador e bomba. Entretanto, na maioria das instalações de potência a vapor reais utilizam-se configurações mais complexas, visando melhorar a eficiência térmica possível de se obter no ciclo, isto é, tornar possível obter uma maior energia produzida para a mesma quantidade de energia primária fornecida. Dentre as configurações para melhoria do rendimento Moran e Shapiro (2009) citam: reaquecimento do vapor que executa trabalho sobre a turbina, extraíndo-o em algum estágio da turbina, passando-o pela caldeira novamente e devolvendo-o ao mesmo estágio da turbina numa temperatura mais elevada; aquecimento da água de alimentação da turbina por meio do calor proveniente de vapor extraído em algum estágio da turbina da turbina (regeneração). Além destas, os autores ainda citam a possibilidade de utilizar a considerável quantidade de calor que seria “desperdiçada” por meio do condensador para fornecer aquecimento de outro SPV operando adjacientemente, podendo-se denominar tal processo de aproveitamento como cogeração (MORAN; SHAPIRO, 2009). A Cogeração também pode ser empregada para aproveitar a energia desperdiçada na exaustão de Sistemas de Potência a Gás para promover o aquecimento da água em SPVs, sendo estes denominados Sistemas de Potência Combinados, onde o uso de caldeiras é dispensado no SPV adjacente.

As letras p , T , h e s indicam respectivamente, pressão, temperatura, entalpia e entropia dos estados indicados pelo número após estas letras e um sinal de underline “_”.

Neste problema procurou-se calcular a eficiência térmica e a vazão mássica de vapor que entra na turbina, para as condições de propriedades dadas em cada estado.

```

EES Professional: C:\Users\HP\Documents\Eng. Mecânica\TCC\Aprendendo a trabalhar com o software\1. Sistemas de Potência a Va
File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples
{Propriedades fornecidas e cálculo das não fornecidas para cada estado;}

{Estado 1;}
p_1=8000[Kpa]
T_1=480 [C]
h_1=Enthalpy(Steam,T=T_1,P=P_1)
s_1=Entropy(Steam,T=T_1,P=P_1)

{Estado 2s;}
p_2s=700 [Kpa]
s_2s=s_1
h_2s=Enthalpy(Steam,s=s_2s,P=P_2s)

{Estado 2;}
p_2=700[Kpa]
Eta_turbina= 0.85
Eta_turbina = (h_1-h_2)/(h_1-h_2s)
s_2=Entropy(Steam,h=h_2,P=P_2)

{Estado 3s;}
p_3s=8 [kPa]
s_3s=s_2
h_3s=Enthalpy(Steam,s=s_3s,P=P_3s)

{Estado 3;}
Eta_turbina=(h_2-h_3)/(h_2-h_3s)
p_3=p_3s

{Estado 4;}
p_4=p_3
x_4=0
h_4=Enthalpy(Steam,x=x_4,P=P_4)
s_4=Entropy(Steam,x=x_4,P=P_4)

{Estado 5;}
p_5=700[kPa]
s_5=s_4 {Bomba isoentrópica (ideal)}
h_5=Enthalpy(Steam,s=s_5,P=P_5)

```

Figura 2 – Programação no EES para modelagem do SPV apresentado (parte 1)

Selecionado-se as opções “*calculte*” e após isto “*solve*”, foi facilmente possível obter os resultados desejados, conforme mostra a figura 4.

Adicionalmente, ainda foi verificada a variação para este SPV a influência da variação da eficiência da turbina (em ambos estágios) sobre a eficiência do ciclo e a potência líquida de saída, conforme mostra a figuras 5, onde é possível observar que uma propriedade varia de maneira quase linear em função da outra, para este problema.

```

EES Equations Window

{Estado 6;}
p_6=p_5
x_6=0
h_6=Enthalpy(Steam,x=x_6,P=P_6)
s_6=Entropy(Steam,x=x_6,P=P_6)

{Estado 7;}
p_7=p_1
s_7=s_6 {Bomba isoentrópica (ideal)}
h_7=Enthalpy(Steam,s=s_7,P=P_7)

{Cálculo dos parâmetros solicitados pelo problema, agora que já conhecemos todos os estados;}
{(a) Eficiência térmica;}

{Obs: para calcular a eficiência térmica precisamos conhecer cada uma das vazões mássicas;}
{Para tanto fazemos um balanço de energia no aquecedor de água de alimentação aberto, que é um V.C. que envolve as três
vazões mássicas existentes no problema;}
{Adotando as duas turbinas (dois estágios) como um único volume de controle, também teríamos um V.C. que envolve as três
vazões mássicas, entretanto, não conhecemos qual é a potência das turbinas, apenas conhecemos qual é a potência líquida
do ciclo, que é a potência das turbinas subtraídas das potências das bombas;}

{Aplicando balanço de energia (1ª lei para V.C.) no aquecedor de água de alimentação aberto, já simplificando a variável "
m_dot_1" de modo que sobre apenas "y" como incógnita;}

y = (h_6-h_5)/(h_2-h_5)

m_dot_1*(h_1-h_2) + m_dot_1*(1-y)*(h_2-h_3) - m_dot_1*(1-y)*(h_5-h_4) - m_dot_1*(h_7-h_6) = W_dot_liq
m_dot_2 = y*m_dot_1
m_dot_3 = (1-y)*m_dot_1

Eta_ciclo = (W_dot_liq)/(Q_dot_entra)
W_dot_liq = 100*10^3 [KJ/s]

Q_dot_entra = m_dot_1*(h_1-h_7)

{(b) A vazão mássica de vapor que entra no primeiro estágio da turbina;}

{Este valor é m_dot_1, já calculado no item (a)}

```

Figura 3 – Programação no EES para modelagem do SPV apresentado (continuação)

Unit Settings: [kJ]/[C]/[kPa]/[kg]/[degrees]			
$\eta_{\text{ciclo}} = 0.3692$ [kJ/kg]	$\eta_{\text{turbina}} = 0.85$	$h_1 = 3349$ [kJ/kg]	$h_2 = 2833$ [kJ/kg]
$h_{2s} = 2742$ [kJ/kg]	$h_3 = 2249$ [kJ/kg]	$h_{3s} = 2146$ [kJ/kg]	$h_4 = 173.7$ [kJ/kg]
$h_5 = 174.4$ [kJ/kg]	$h_6 = 697.3$ [kJ/kg]	$h_7 = 705.3$ [kJ/kg]	$\dot{m}_1 = 102.5$
$\dot{m}_2 = 20.15$	$\dot{m}_3 = 82.31$	$p_1 = 8000$ [Kpa]	$p_2 = 700$ [Kpa]
$p_{2s} = 700$ [Kpa]	$p_3 = 8$ [kPa]	$p_{3s} = 8$ [kPa]	$p_4 = 8$ [kPa]
$p_5 = 700$ [kPa]	$p_6 = 700$ [kPa]	$p_7 = 8000$ [Kpa]	$\dot{Q}_{\text{entra}} = 270839$ [kJ/kg]
$s_1 = 6.659$ [kJ/kg-K]	$s_2 = 6.861$ [kJ/kg-K]	$s_{2s} = 6.659$ [kJ/kg-K]	$s_{3s} = 6.861$ [kJ/kg-K]
$s_4 = 0.5921$ [kJ/kg-K]	$s_5 = 0.5921$ [kJ/kg-K]	$s_6 = 1.992$ [kJ/kg-K]	$s_7 = 1.992$ [kJ/kg-K]
$T_1 = 480$ [C]	$\dot{W}_{\text{liq}} = 100000$ [kJ/kg]	$x_4 = 0$	$x_6 = 0$
$y = 0.1967$			

Figura 4 – Resultados obtidos para a simulação proposta

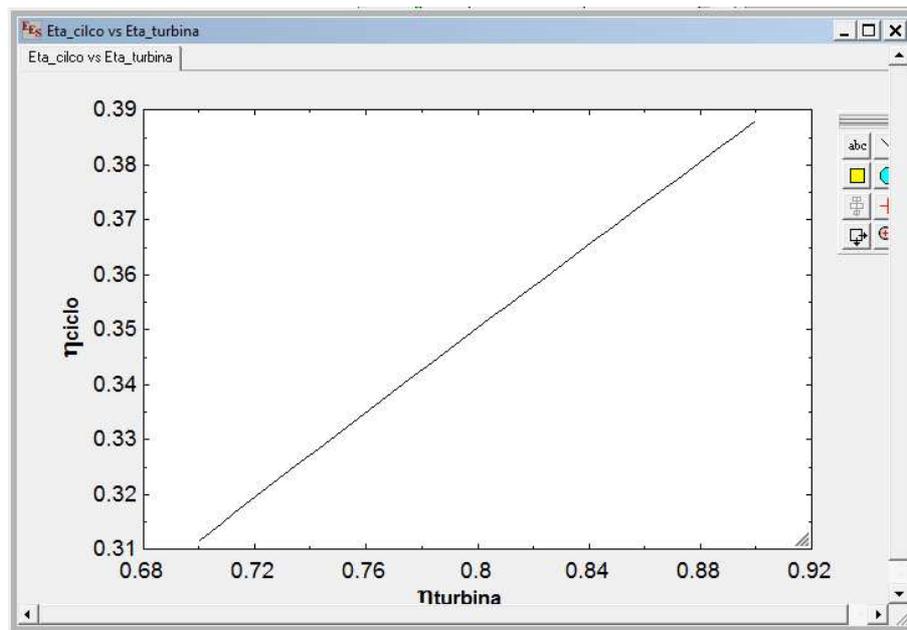


Figura 5 – Influência da variação da eficiência isentrópica da turbina sobre a eficiência térmica do ciclo

Considerações Finais

Pôde-se concluir que o EES de fato é uma ferramenta bastante versátil para a resolução de problemas de Engenharia, em especial na área de Sistemas Térmicos, para a qual foi criado, devido as suas características principais em relação a *softwares* de simulação mais sofisticados: facilidade de programação; velocidade de programação e obtenção dos resultados; baixo custo de aquisição; baixa capacidade computacional requerida. Seu uso é indicado tanto para o âmbito acadêmico, quanto industrial.

Referências Bibliográficas

- Adams, T. M., Abdel-Khalik, S. I., JETER, S. M., QURESHI, Z. H. An experimental investigation of single-phase forced convection in microchannels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 41, nos 6-7, pp. 851-857, 1998.
- BIG – Banco de Informações de Geração. Matriz Energética do Brasil. Aneel. 2012. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoGeracaoTipo.asp?tipo=5&ger=Combustivel&principal=Biomassa>>. Acesso em 7 de Julho de 2012.
- Bazilian, M. D., Prasad, D. Modeling of a photovoltaic heat recovery system and its role in a design decision support tool for building professionals. *Renewable Energy*, v. 27, 2002, p. 57-68.
- Cañizares, C. A., Faur, Z. T. Advantages and disadvantages of using various computer tools in Electrical Engineering Courses. *IEEE Transactions on Education*, v. 40, n. 3, Agosto de 1997.
- Çengel, Y. A., Boles, M. A. *Termodinâmica*. 5. Ed. São Paulo, SP: McGraw-Hill, 2006. 740 p.
- Forristall, R., Heat Transfer analysis and modeling of a parabolic through solar receiver implemented in Engineering Equation Solver. US department of Energy. Outubro de 2003. Disponível em <<http://www.osti.gov/bridge>>. Acesso em 3 de julho de 2012.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., “Fundamentals of Engineering Thermodynamics”. 5. Ed. New York: John Wiley, 2004. Xi, 874 p.: ISBN 0-471-27471-2.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N. “Princípios de Termodinâmica para Engenharia”. 6. Ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2009. Xi, 800 p. ISBN 8521613407.
- Liao, S. M., Zhao, T. S., Jakobsen, A. A correlation of optimal heat rejection pressures in transcritical carbon dioxide cycles. *Applied Thermal Engineering*, v. 20, 2000, p. 831-841.